第40卷 第8期
2023年8月
干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH
Vol. 40 No. 8
Aug. 2023

河套灌区不同配置农田防护林对田间土壤水分和养分储量的影响

冀明欣[1]， 冯天骄[1,2]， 肖辉杰[1]， 辛智鸣[3]， 李俊然[4]， 王 栋[1]

（1. 北京林业大学水土保持学院，北京 100083；2. 山西吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站，山西 吉县 042200；3. 内蒙古磴口荒漠生态系统国家定位观测研究站，内蒙古 磴口 015200；4. 香港大学地理系，香港 999077）

摘 要：农田防护林作为提高生态环境效益的有效农业管理方式，对改善土壤理化性质、改善生态环境，提高作物产量具有重要意义。在河套灌区选择三种典型农田防护林（4行林带、5行林带和8行林带）测量了2019—2021年生长季农田内距防护林0.3 H、0.7 H、1 H、2 H、3 H和4 H处0~100 cm的土壤性质和防护林与农田的植被属性，测算了土壤水分储量（SMS）和土壤养分储量[碳储量(SCS)、氮储量(SNS)和磷储量(SPS)]。结果表明：（1）不同防护林系统水平方向上的土壤容重和土壤黏粒含量差异显著，在垂直方向上土壤属性均有显著差异。（2）防护林具有较好的保水性和养分供应功能，其中4行林带的土壤水分储量和养分储量高于其他林带，分别为SMS 237.44 mm、SCS 544.93 $g\cdot m^{-2}$、SNS 953.72 $g\cdot m^{-2}$和SPS 859.04 $g\cdot m^{-2}$。（3）4行林带的整体长势比较好，其平均树高为30.06 m，胸径为0.41 m，且4行防护林的作物产量最高，为15.75 $t\cdot hm^{-2}$。（4）冗余分析结果显示，不同防护林系统中，环境因子与生态系统功能之间存在密切关系，土壤特性与土壤水分和养分储量关系密切，另外，植被属性与SNS和SPS基本呈负相关。综上所述，4行林带的水分养分供给能力最强，本研究结果可为生态脆弱地区的防护林建设和生态修复提供有效的理论依据。

关键词：农田防护林；土壤性质；植被属性；生态系统功能；农田管理

农田防护林是一个复合体，是提高生态环境效益的人工生态工程，可以通过降低风速、稳固水土和涵养水源等功能，营造出良好的生态环境，对人民生活水平提供多种效用[1-2]。通过在农田周围设计和建设防护林网，为农田作物创造了高产稳产的有利条件。随着防护林的建设，关于农田防护林的研究也越来越深入，也取得了非常显著的效益[3]。但防护林带与作物之间的资源竞争也不容忽视，林网的"胁地"效应严重，会造成土壤水分亏缺，影响氮素的积累[4]。

土壤水分是作物吸收水分的主要来源，土壤碳氮磷是防护林体系土壤养分的重要组成成分。有研究认为，防护林带内的农田比无防护林保护的农田土壤水分蒸发量少，土壤含水量增加[5]，由此可见，农田防护林在灌区土壤水分调节中发挥了重要作用；同时，林带还减少耕地土壤养分的流失，增加养分的积累与供给[6-7]。农林复合系统能够更有效地利用水分和养分，提高土壤有机质的稳定性，提高土壤有机碳储量[8]；防护林可以为土壤剖面不同深度有机碳的形成提供稳定的碳源，根系分解可以增加土壤有机碳密度[9]。根系与土壤之间的相互作用可以提高土壤保持水分和养分的能力，但是农田防护林与农田作物根系交织在一起，也会发生水分和养分竞争，尤其是在干旱和半干旱地区，树木和作物之间的地下竞争严重，水肥资源竞争是农林复合系统中作物生产力的主要决定因素[10]。有研究发现，靠近防护林处的农田土壤含水量少[11]，土壤各养分指标均受土层和与农田边缘垂直距离的显

收稿日期：2023-01-28； **修订日期：**2023-04-05
基金项目：国家重点研发计划政府间国际科技创新合作专项(2019YFE0116500)；国家自然科学基金(31870706,41901021)；天津市科技计划项目(21YFSNSN00170)
作者简介：冀明欣(1998-)，女，硕士研究生，主要从事林业生态工程研究. E-mail: 1741992673@qq.com
通讯作者：冯天骄. E-mail: fengtianjiao1991@bjfu.edu

著影响，且存在一定的交互作用[12]。

目前，很多学者研究了防护林防护范围内的土壤改良效益[13-14]、防风固沙效益和农作物增产效益。但对农田防护林体系内土壤水分和养分储量，不同农田防护林系统养分供给和水分保持能力的研究较少。为了量化防护林对农田土壤水分和养分储量的影响，本研究以内蒙古自治区巴彦淖尔市磴口县中国林业科学研究院沙漠林业实验中心第二试验场典型防护林系统为研究对象，通过对比土壤水分和养分储量，核算其保持水土和养分供给的生态服务功能，拟解决以下问题：(1) 确定不同配置农田防护林系统内的土壤性质和植被属性的生态效应，以及相关的生态系统功能(水源保持和养分供应)；(2) 探讨不同环境因素(土壤和植被)与土壤水分/养分储量之间的关系，寻找最佳的农田防护林配置模式。本研究可为干旱半干旱地区农田防护林建设工作提供数据基础，为防护林下的农田规划管理提供理论支持。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

试验地位于内蒙古磴口县荒漠生态系统国家定位研究站，主要研究区位于中国林业科学院沙漠林业实验中心第二试验场农田防护林内(106°35′~106°59′E，40°17′~40°29′N；图1a)，海拔1040 m。该地区属温带大陆性季风气候，冬季寒冷漫长，春秋短暂，夏季炎热，年平均降水量142 mm，降雨主要集中在6—9月，约占全年降水量的70%~80%；蒸发量为2387.6 mm，年平均气温7.6 ℃，昼夜温差大，日照充足，年日照时数约3000 h。年平均地下水位为3~4 m，防护林内灌溉方式为引黄河水大水漫灌。农田内灌溉方式为覆膜滴灌，灌溉时间间隔7~10 d，每次灌溉量为420 $m^3 \cdot hm^{-2}$，每年总灌溉量为6300 $m^3 \cdot hm^{-2}$。该防护林体系包括传统的小网格、窄林带，主要树种为新疆杨(*Populus alba* var. *pyramidalis* Bge)、白杨(*Populus tomentosa*)、小美旱杨(*Populus popular's*)和圆柏(*Sabina chinensis*)，与防护林相关的主要作物是玉米(*Zea mays* L.)和向日葵(*Helianthus annuus* L.)。

1.2　试验设计

为研究作物生长阶段土壤水分和养分储量变化，以气象站为中心选择3个防护林样地(图1b)，防护林树种配置分别是4行、5行、8行(图1c)，于2019年5月开始调查取样，对三种不同配置的农田防护林结构进行了调查，记录样地树种配置、树高、林带

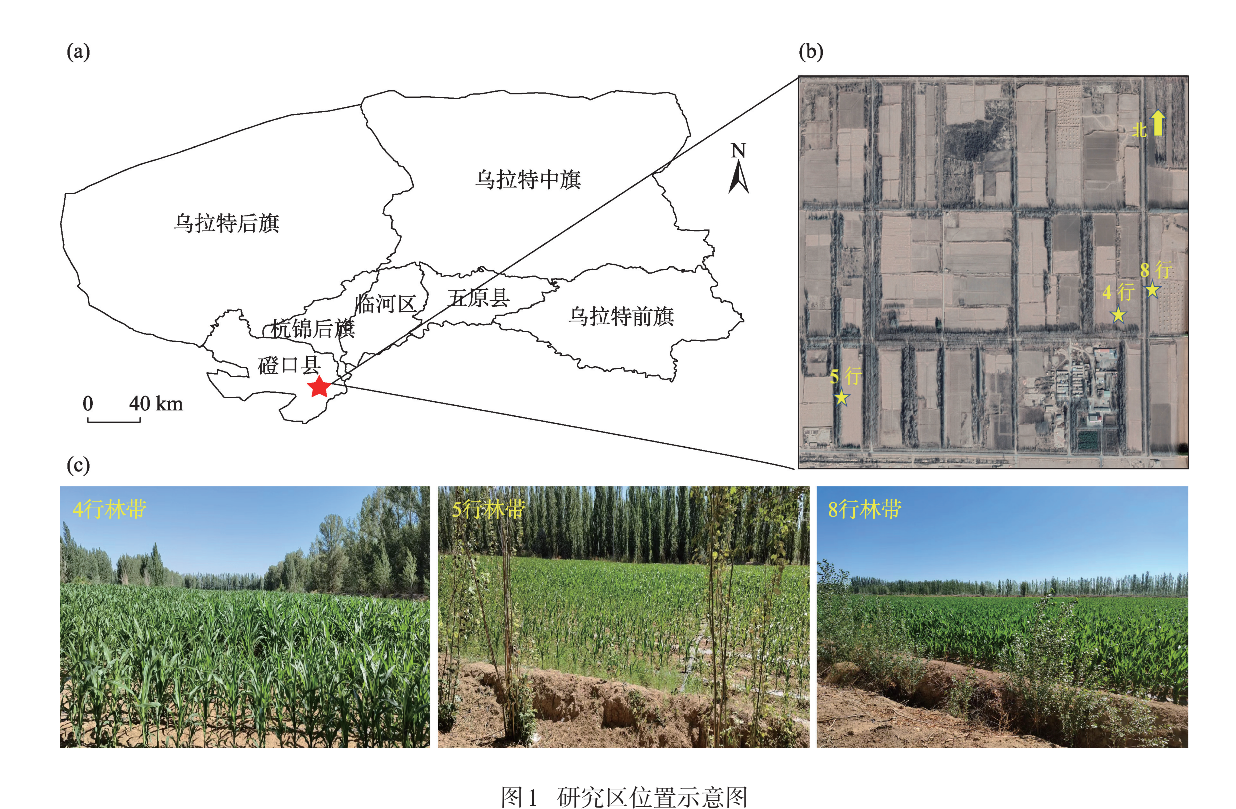


图1　研究区位置示意图

Fig. 1　Location of the study area

长度、树间间距、林龄(表1)。选择与防护林样地邻近的农田作为试验样地,农田作物均为玉米,磷酸二铵做底肥,施肥量为600 kg·hm^{-2},尿素做追肥,追肥总量为600 kg·hm^{-2}。采样点分别设置在距农田边缘0.3 H、0.7 H、1 H、2 H、3 H和4 H处(H为树高),每个样地每次取3次重复。

1.3 数据采集

1.3.1 土壤取样和室内分析　土壤样品采集于2019—2021年生长季,在5月、8月和10月进行取样,样品使用土壤螺旋钻(直径50 mm)获取,取样深度为1 m,剖面内每20 cm取样一次,并在随机位置重复三次。对于每个深度的土壤样品,一部分样品放在铝盒里,另一部分放在自封袋内,然后带到实验室进行进一步分析。

铝盒内土样采用烘干法(105 ℃,9 h)测定土壤含水量(SWC),采用环刀法测定土壤容重(BD),采用电极法测定土壤pH。自封袋内土壤样品自然风干后研磨,过2 mm圆孔土壤筛,取过筛土样进行土壤预处理分散土样后,使用激光粒径分析仪(S3500, Microtrac, USA)测定土壤的粒径组成[土壤黏粒(clay)、粉粒(silt)和砂粒(sand)含量];过100目筛,一部分土样采用重铬酸钾外加热法测定土壤有机碳(SOC);另一部分样品进行消煮后使用全自动化学分析仪测定土壤全氮(TN)、全磷(TP)。

1.3.2 土壤水分储量和土壤养分储量的计算　土壤水分储量(SMS, mm)、土壤碳储量(SCS, g·m^{-2})、土壤氮储量(SNS, g·m^{-2})和土壤磷储量(SPS, g·m^{-2})的计算公式如下:

$$\mathrm{SMS}=\sum_{i=1}^{n}\theta_i \mathrm{BD}_i S T_i \times 10 \qquad (1)$$

式中:i为土层数;n为总土层数;θ_i和T_i分别为i土层的土壤质量含水量和土层厚度(cm);S为地块面积(m^2);BD$_i$为i土层的容重(g·cm^{-3});10为传递系数。

$$C_i = C_{fi}\mathrm{BD}_i(1-\delta_{2\,\mathrm{mm}})T_i \times 10 \qquad (2)$$

$$\mathrm{SCS}=\sum_{i=1}^{n} C_i \qquad (3)$$

式中:C_i表示i层土壤碳储量(g·m^{-2});C_{fi}表示i土层土壤碳的质量分数(g·kg^{-1});$\delta_{2\,\mathrm{mm}}$表示土壤粗颗粒(树枝、石砾等直径>2 mm的杂质)的百分比。

采用类似的方法,计算了土壤氮储量(SNS,g·m^{-2})和土壤磷储量(SPS,g·m^{-2}),公式如下:

$$\mathrm{SNS}=\sum_{i=1}^{n} N_{fi}\mathrm{BD}_i(1-\delta_{2\,\mathrm{mm}})T_i \times 10 \qquad (4)$$

$$\mathrm{SPS}=\sum_{i=1}^{n} P_{fi}\mathrm{BD}_i(1-\delta_{2\,\mathrm{mm}})T_i \times 10 \qquad (5)$$

式中:N_{fi}和P_{fi}分别代表土壤氮和磷在i土层的质量分数(g·kg^{-1})。

1.3.3 农田防护林系统植被属性调查　2019—2021年8月进行了植被属性调查。使用LIDAR(光探测和测距)扫描了防护林中的植被属性,使用RIEGL VZ-400系列地面扫描仪获取点云数据库[15]。首先,使用LiDAR 360软件(美国GeoCue)根据种子点提取单个数据,通过拼接、去噪和归一化对LiDAR点云进行预处理,以减少数据冗余。其次,采用改进的渐进式三角剖分密集算法对地面点进行分类。第三,利用不规则三角网插值算法生成精确、高分辨率的数字高程模型,实现点云与地面的分离。最后可以提取单个植物的数据,包括树高(Height,m)、冠层大小(CS,m^2)、冠幅体积(CV,m^3)、胸径(DBH,m)和枝下高(HBB,m)。

同时调查了农田植被属性。通过高角度拍摄的照片和Photoshop 2018软件(Adobe,USA)中的照片分析估算植被覆盖率(COVERAGE,%)。分别通过标准样本(平均标准样本法选择)和农户调查测算农作物植株高度和作物产量。

计算农田和防护林中的细根生物量密度(FRBD,g·kg^{-1}),在每个采样位置周围,使用直径为7 cm的根系螺旋钻进行取样,垂直方向每隔20 cm取一层,每层取土体积为388 cm^3,取样深度为100 cm。样品密封在塑料袋中,运至实验室,用水喷雾

表1 农田防护林基本信息

Tab. 1 The specific information of tested farmland shelterbelts

样地	树种分配	树高/m	林带长/m	树间间距	林龄/a	农田作物
4行	3行小美旱杨+1行沙枣	30.06	340	2.5 m×1.5 m	30	玉米
5行	4行二白杨+1行小美旱杨	23.85	340	2.0 m×1.5 m	33	玉米
8行	8行新疆杨	25.42	340	2.0 m×1.5 m	33	玉米

清洗，人工提取细根。将根在70 ℃下烘干24 h，以获得干根生物量。细根生物量密度（FRBD，g·cm^{-3}）计算公式如下：

$$\mathrm{FRBD} = W_d / V_s \quad (6)$$

式中：W_d为根系干重（g）；V_s为土壤体积（cm^3）。

1.4　数据分析和处理

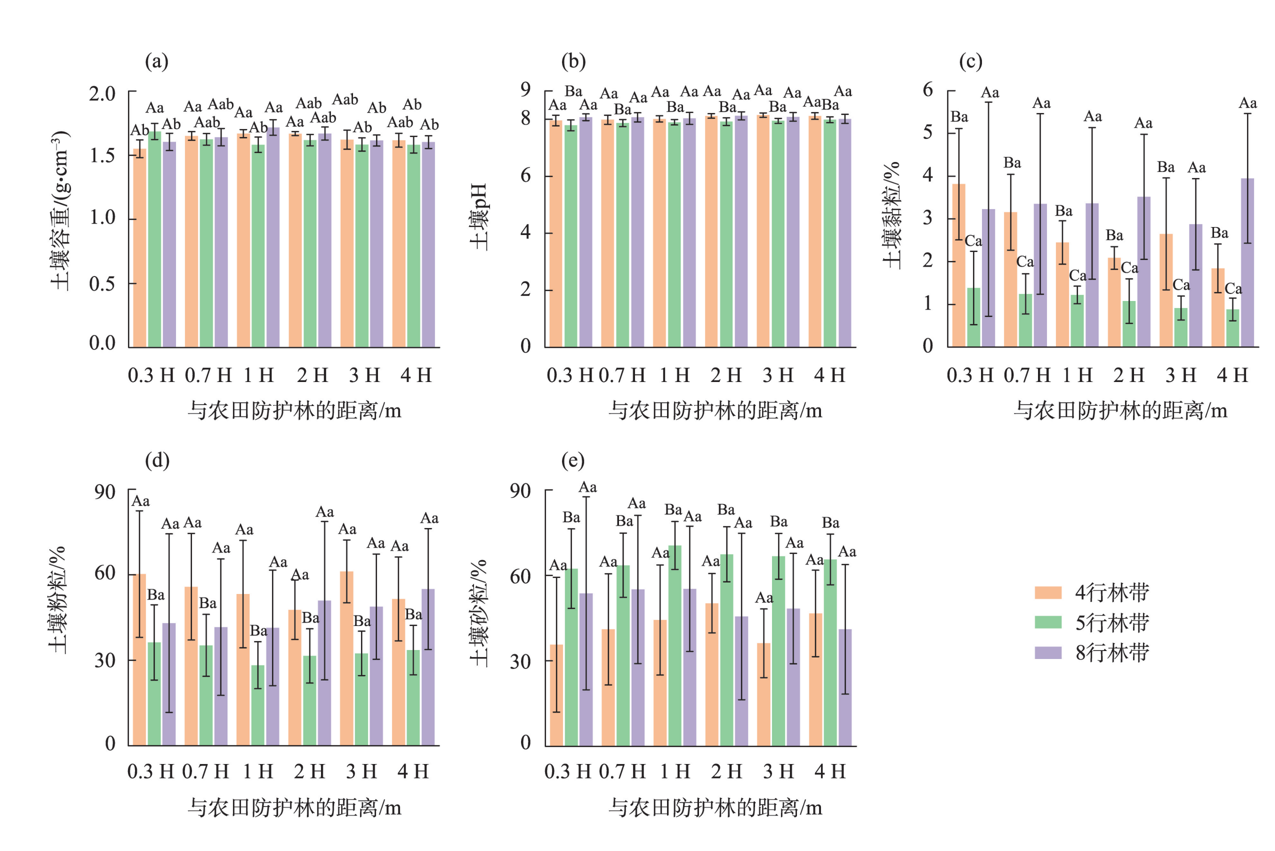
在Excel中对数据进行统计分析，在SPSS中通过单因素方差分析(one-way ANOVA)进行显著性检验，多重均数比较采用Duncan检验。用Origin进行制图。使用CANOCO 5进行冗余分析（RDA），计算环境因素对农田防护林系统生态系统功能的相对贡献率。其中，土壤特性（即BD、pH、clay、silt和sand）、植被属性（即Height、DBH、CS、CV、HBB、FRBD和COVERAGE）作为环境变量。

2　结果与分析

2.1　不同防护林之间的土壤基础性质

2.1.1　不同防护林水平方向上的土壤基础性质特征　图2显示了不同农田防护林系统水平方向上的土壤属性。三种不同配置农田防护林的土壤容重差异不显著，4行林带、5行林带和8行林带的土壤容重分别为1.63 g·cm^{-3}、1.62 g·cm^{-3}、1.65 g·cm^{-3}。从水平距离上看，4行和8行林带的土壤容重峰值出现在1 H、2 H处，5行林带出现在0.3 H处（图2a）。防护林系统内土壤pH值均为弱碱性（分别为8.05、7.93和8.08）（图2b）。土壤颗粒组成存在显著差异（图2c~图2e），总体来说，防护林系统内的土壤黏粒含量相对较低，土壤砂粒含量相对较高，土壤黏粒、土壤粉粒和土壤砂粒含量整体平均值为2.39%、44.86%和52.73%。5行林带的土壤黏粒和土壤粉粒含量低于4行林带和8行林带（1.12%和32.87%），而土壤砂粒含量较高。4行林带和8行林带的土壤砂粒含量分别为42.35%和49.84%。

2.1.2　不同防护林垂直方向上的土壤基础性质特征　图3为不同防护林系统垂直方向上的土壤属性。4行林带的土壤容重在垂直方向随土层深度增加差异不显著，但5行林带和8行林带在20~40 cm土壤容重最高，为1.68 g·cm^{-3}和1.72 g·cm^{-3}（图3a）。三种农田防护林体系土壤pH随土层深度增加



注：大写字母代表不同防护林之间的差异显著性，小写字母代表同一防护林内不同距离的差异显著性（$P \leq 0.05$）。下同。

图2　不同防护林系统土壤基础性质随林带水平距离的变化

Fig. 2　Changes of soil basic properties with horizontal distance of forest belt in different shelterbelts

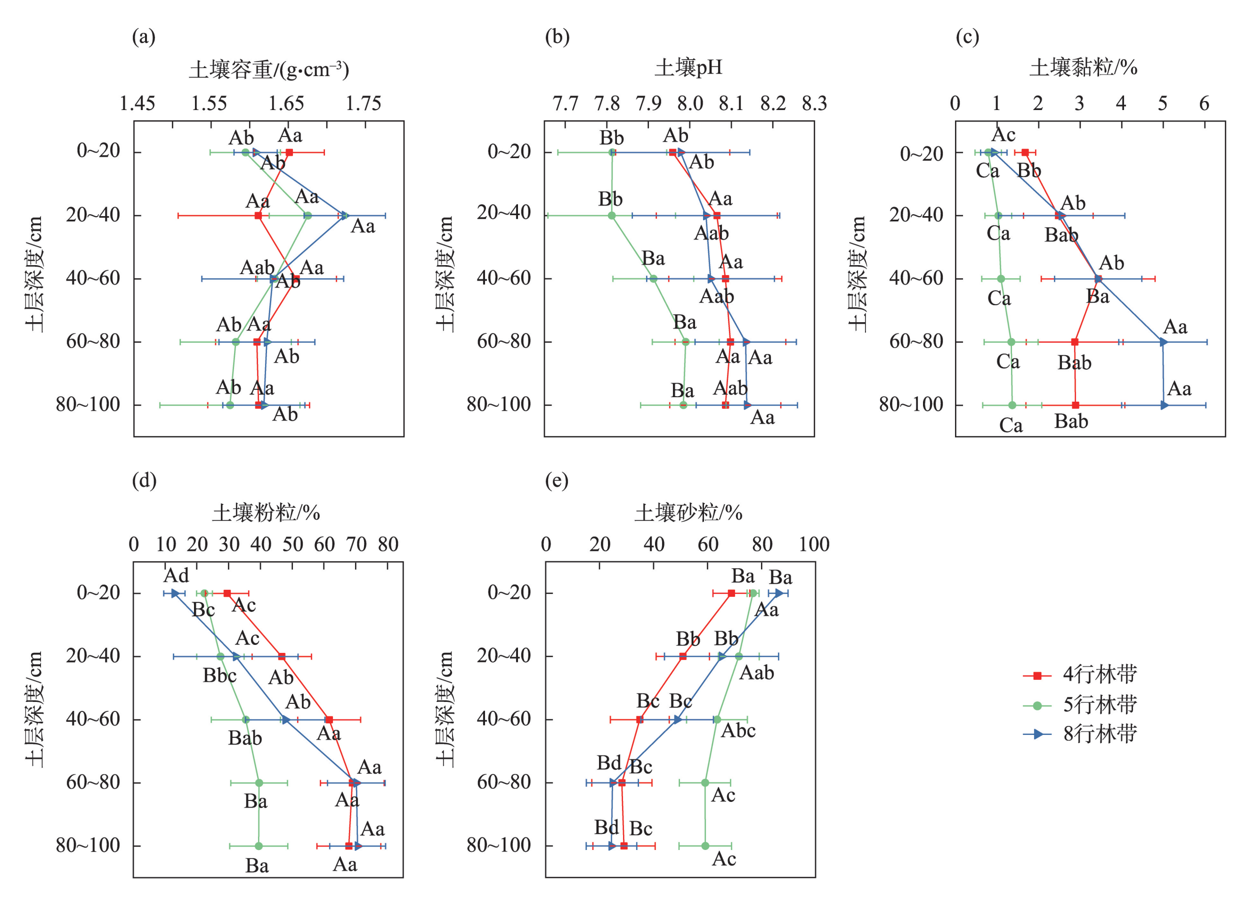


图3 不同防护林系统土壤基础性质随土层深度的变化

Fig. 3 Changes of soil basic properties with soil depth in different shelterbelts

差异较小，且均为弱碱性，浅层土壤的pH值最低（图3b）。土壤颗粒组成在垂直方向上存在显著差异（图3c~图3e），农田防护林系统内的土壤黏粒含量均较低，其中5行林带最低；土壤粉粒含量随土层深度增加均呈逐渐增加的趋势，而土壤砂粒含量呈逐渐降低的趋势，8行林带的土壤颗粒组成在0~80 cm内差异显著，土壤砂粒含量在0~20 cm最高，为86.16%，而在60~80 cm含量仅为24.75%。

2.2 不同防护林之间的水分、养分和碳储量

图4a显示了不同防护林系统在水平方向上各土层的土壤水分储量。结果表明，不论在水平方向还是在垂直方向，土壤水分储量均有显著差异。且总体表现为随水平距离增加先增加后降低的趋势，在0.3 H处土壤水分储量均最低，其中8行林带最低为149.63 mm，5行和8行林带的峰值出现在2 H处，4行林带的峰值出现在3 H处，分别为227.55 mm、290.80 mm和279.59 mm。从总体上看，4行林带在0~1 m的土壤储水量最高，总计237.44 mm，其次是8行林带（236.75 mm）。5行林带的土壤储水量为199.51 mm，显著低于其他处理。对比计算不同防护林系统0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm、60~80 cm和80~100 cm的5个土层的土壤水分储量，发现深层土壤对土壤储水量的贡献大于表层土壤，具体而言，0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm、60~80 cm和80~100 cm的土壤储水量分别占土壤总储水量的11.28%、15.11%、22.99%、25.37%和25.32%，40 cm以下土层的土壤储水量贡献显著高于0~40 cm土层。总体来说，4行林带的水分保持功能最强。

不同配置农田防护林随距林带距离增加的土壤养分储量见图4b，从整体上看，4行林带0~1 m土壤碳储量为544.93 g·m^{-2}，高于8行林带和5行林带（418.76 g·m^{-2}和406.27 g·m^{-2}）。从水平距离上看，4行林带1 H处的土壤碳储量最高，为595.44 g·m^{-2}；5行林带4 H处的土壤碳储量最低，为364.85 g·m^{-2}。5行林带的土壤碳储量在水平方向上值逐渐降低，4行和8行林带呈先增加后降低的趋势。与土壤储水量相比，土壤碳储量的垂直变化略有不同。0~20 cm、20~40 cm和40~60 cm土层的土壤碳储量分别

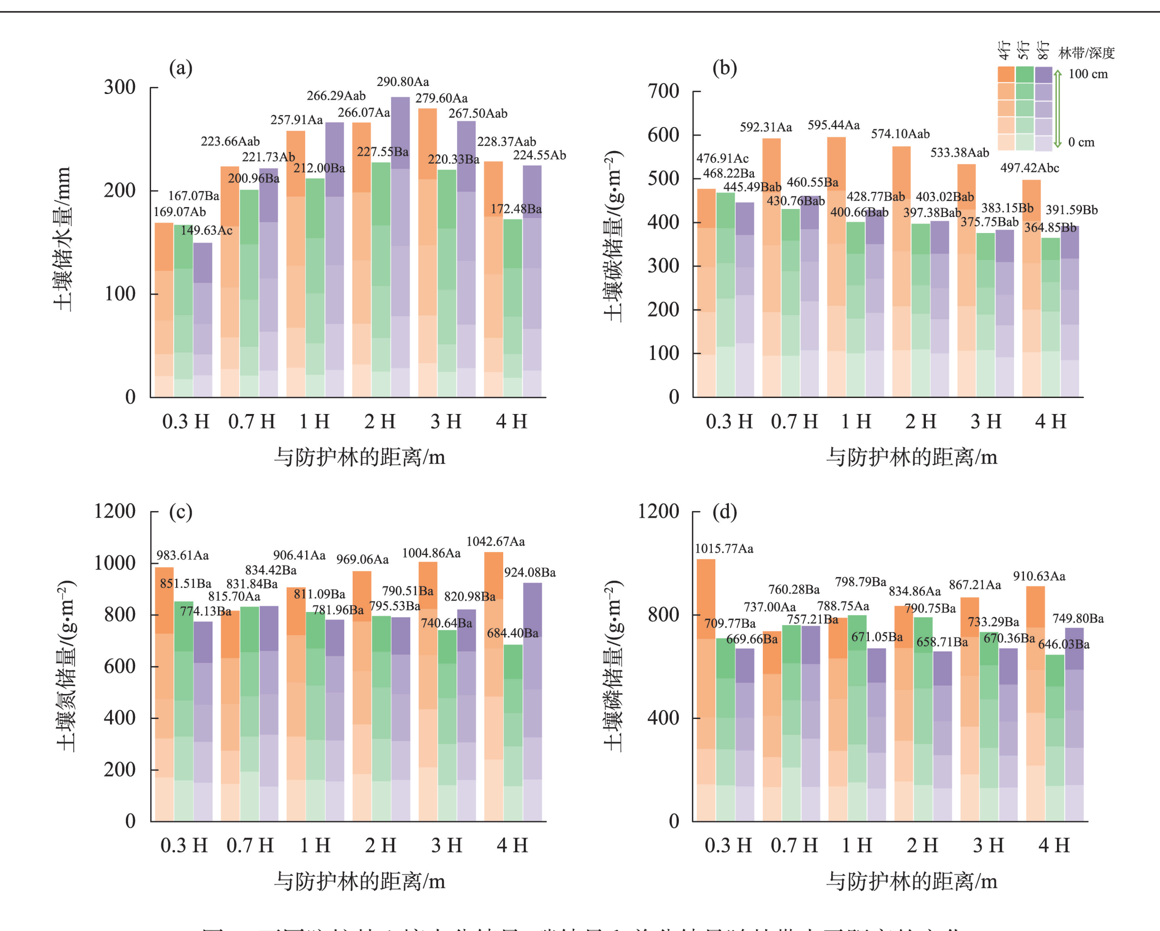


图4　不同防护林土壤水分储量、碳储量和养分储量随林带水平距离的变化

Fig. 4　Changes of soil water storage, carbon storage and nutrient storage in different shelterbelts along with the horizontal distance of forest belt

为103.92 g·m^{-2}、93.21 g·m^{-2}和92.62 g·m^{-2},分别占总碳储量的22.76%、20.41%和20.28%。60~80 cm 和80~100 cm土层对土壤碳储量的贡献小于20%,分别占18.34%和18.30%。

三种农田防护林系统随距林带距离增加土壤氮磷储量的变化见图4c~图4d。其中,土壤氮储量在4行林带随距离增加呈先降低后增加的趋势,在0.7 H处最低,为815.70 g·m^{-2},在4 H处最高,为1042.67 g·m^{-2};5行林带随距离增加逐渐降低;8行林带随距离增加呈波动上升趋势,在4 H处达到最高,为924.08 g·m^{-2}。0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm、60~80 cm 和 80~100 cm 的土壤氮储量平均值分别为166.89 g·m^{-2}、167.85 g·m^{-2}、177.55 g·m^{-2}、170.92 g·m^{-2}和170.30 g·m^{-2},差异不显著。土壤磷储量也存在差异,5行和8行林带在水平方向上呈先增加后降低的趋势,而4行林带刚好相反。4行林带0.3 H处最高,为1015.77 g·m^{-2},8行林带2 H处最低,为658.71 g·m^{-2}。从总体上看,4行林带的土壤磷储量最高,为859.04 g·m^{-2},显著高于5行林带和8行林带(739.82 g·m^{-2}和696.13 g·m^{-2})。0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm、60~80 cm 和 80~100 cm 的土壤磷储量平均值分别为149.41 g·m^{-2}、148.78 g·m^{-2}、158.68 g·m^{-2}、154.35 g·m^{-2}和153.18 g·m^{-2},差异不显著。总体来说,4行林带的养分供给功能高于其他林带。

2.3　不同防护林系统的植被属性

表2比较了不同防护林系统的植被属性。在株高方面,4行林带的平均株高为30.06 m,显著高于其他类型防护林。在胸径方面,4行和5行林带的平均DBH分别为0.41 m和0.48 m,显著高于8行林带(为0.34 m)。4行和8行林带的冠层大小和树冠体积均显著高于5行林带。5行林带的枝下高为1.09 m,显著低于其他处理。不同农田防护林系统中的个体株高和植被盖度没有显著差异。4行林带和8行林带的作物产量较高(15.75 t·hm^{-2}和15.64 t·hm^{-2}),显著高于5行林带(9.29 t·hm^{-2})。

2.4　不同防护林中环境因子与生态系统服务功能的关系

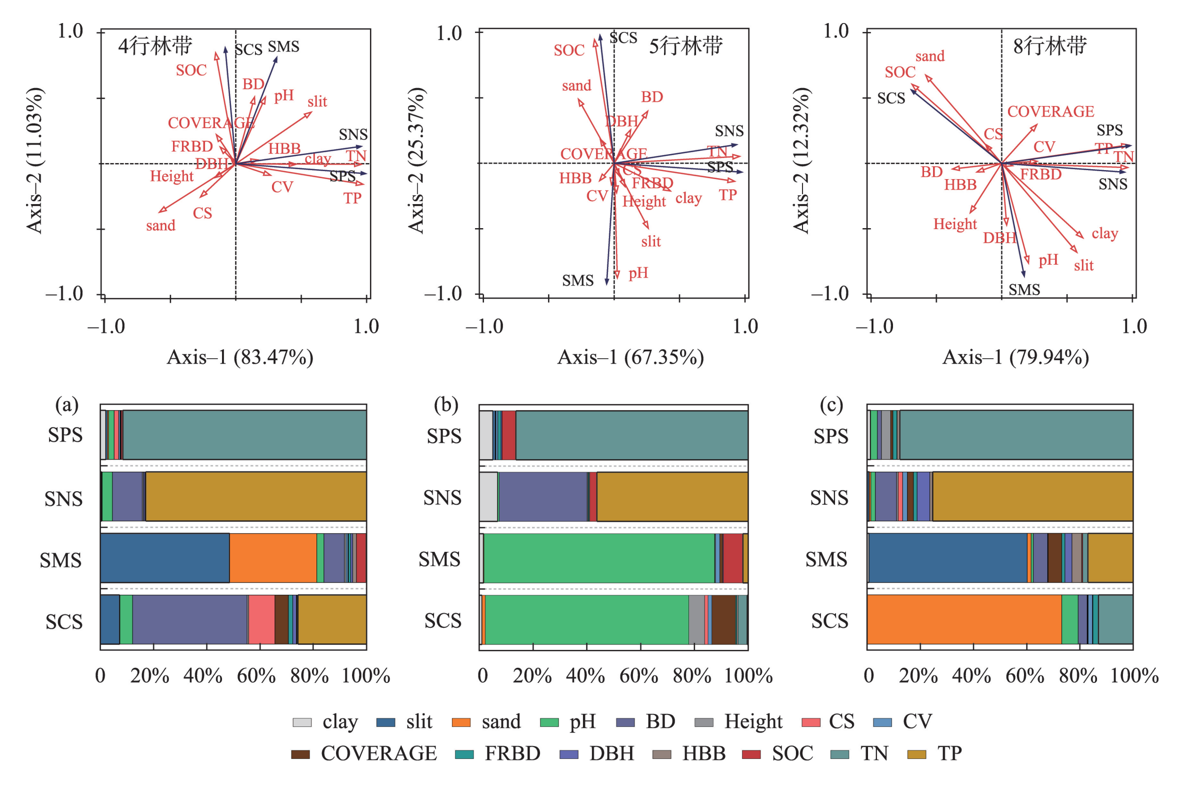
图5描述了冗余分析的结果以及各影响因子对

表2 不同农田防护林系统的植被属性

Tab. 2 Vegetation attributes of different farmland shelterbelts

样地	防护林						农田		
	树高/m	胸径/m	冠层大小/m²	树冠体积/m³	枝下高/m	FRBD /(g·cm^{-2})	植被盖度/%	个体株高/cm	作物产量 /(t·hm^{-2})
4行	30.06±0.49A	0.41±0.02B	8.70±1.07A	68.97±8.70A	1.82±0.41A	1.31±0.04A	85.73±0.81A	134.52±10.87A	15.75±0.99A
5行	23.85±0.71C	0.48±0.05B	4.47±0.59B	43.99±4.02B	1.09±0.58B	1.24±0.13A	86.13±1.15A	129.12±10.89A	9.29±1.09B
8行	25.42±0.82B	0.34±0.04A	6.91±0.92A	77.41±13.31A	2.02±0.21A	1.09±0.16A	84.27±0.46A	130.86±10.21A	15.64±0.81A

注:不同大写字母表示不同农田防护林体系模式之间的差异显著性(单向方差分析检验,$P<0.05$)。



注:SMS、SCS、SNS和SPS分别表示土壤水储量、土壤碳储量、土壤氮储量和土壤磷储量;BD、pH、clay、slit、sand是指土壤容重、土壤pH值、黏粒含量、粉粒含量和砂粒含量;SOC、TN、TP是指有机碳、全氮和全磷;Height、DBH、CS、CV、HBB、FRBD和COVERAGE是指高度、胸径、冠层面积、冠层体积、枝下高、细根生物量密度和平均盖度。

图5 不同防护林系统植被属性和土壤特性对土壤水分、养分储量的关系及各影响因子对土壤水分、养分储量的相对贡献度

Fig. 5 The relationship between vegetation attributes and soil characteristics of different shelterbelt systems on soil water and nutrient reserves, and the relative contribution of each influencing factor to soil water and nutrient reserves

SMS、SCS、SNS、SPS的相对贡献度,结果表明,在4行林带中,HBB、CV、clay、slit与SPS和SNS正相关,而BD、pH和COVERAGE与SCS和SMS呈负相关,CS和Height与水分和养分储量均呈负相关。在5行林带内,DBH、BD与SCS和SNS呈正相关,pH与SMS密切相关。8行林带的clay和slit content与SMS和SNS呈正相关,sand和BD与SCS呈正相关,并且COVERAGE与SPS呈正相关。总体来看,在三种防护林系统内,SNS与SPS均呈正相关,而SPS与SCS呈负相关。防护林内TN对SPS的贡献度最大,均在85%以上。TP对SNS的贡献最大,其次是BD,5行林带内BD贡献率最高,为32.64%。4行林带和8行林带内slit对SMS的贡献率最高,分别为48.58%和59.43%,5行林带影响SMS的关键因子为土壤pH,其占比为85.65%。对于SCS来说,在4行林带内BD的贡献度最高,为43.04%,5行林带内pH的贡献度最高,为75.63%,8行林带内sand的贡献度最高,为72.93%。综合不同因子对土壤水分、养分储量的贡献,土壤因子的贡献显著,而各植被属性的贡献度不超过10%。

3 讨 论

农田防护林改善防护林系统内的环境因子,改良农田内土壤条件,保护植被覆盖,提高其生态环境效益[16]。在本研究中不同防护林系统的土壤性质存在显著差异。由于当地相同的耕作方式和施肥管理,不同防护林系统内土壤容重(BD)和土壤pH值无显著差异,表明了人类活动和管理对土壤性质的重要影响[17]。另一方面,防护林系统内土壤颗粒组成有显著差异,不同配置的林带可能会对防护林系统内的小环境微气候产生不同的影响,从而带来不同的环境效益,长期以来,可能会对土壤颗粒组成产生影响,然而同一地域上不同位置的土壤粒径组成往往差别较大,这也可能是由于土壤的空间变异性引起的[18];本文通过研究不同防护林林带条件下土壤粒径组成存在的差异,用来反映防护林长期建设后的土壤环境差异。土壤机械组成可以影响土壤的持水能力和导水性能,改善土壤养分储存条件,从而进一步改善土壤生态功能[11]。本研究也体现了不同防护林系统的土壤养分储量不同,这与之前的研究结果一致[19]。由于防护林网的根系可以增加土壤通气性[20],防护林附近细根的空间分布直接影响土壤水分的吸收和土壤有机碳的积累[21-22],促进防护林的固碳作用,改善土壤的化学循环[23]。同时在农田防护林内,林中的枯枝落叶及地下的微生物分解作用,可以起到改善土壤结构,促进土壤熟化的作用,并且增加土壤有机质含量,有效提高土壤肥力和农田可持续生产力[24]。研究还发现,不同农田防护林系统的农作物产量也有差异,这是由于林网的长期保护使土壤得以改善,稳定的农田防护林对作物的增产、稳产具有重大意义。防护林网能够调节林网内部的温度、湿度条件,林带疏透度影响风速,调节林网内小气候,为农作物提供良好的生长环境,促进作物本身物质与能量的转化和积累,促进作物产量和品质的提高[21,25-26]。本研究中不同防护林植被属性的差异显著,植被属性也是实现生态效益的关键。防护林网是农田生态系统的屏障,防止其受到破坏。综上所述,防护林系统可以改善生态环境,使生态系统更加稳定[11],对脆弱生态区的农业生产具有重要意义[22]。

本研究中,防护林内水平方向上的土壤性质存在显著差异,防护林系统内距林带不同距离可以以不同速度改善土壤质量[27]。农田防护林通过林木与农作物之间的相互依存关系和生态互补功能,使得水肥光热资源能够充分被利用[28-29]。同时研究发现,不同防护林系统在水平方向上的土壤含水量和土壤水分储量均有显著差异,呈先增加后降低的趋势,这表明农田防护林近林缘水分竞争严重,导致作物减产[30]。Hou等[31]发现,对防风林采取断根处理后,土壤含水量显著提高,作物产量增加。本研究中防护林内土壤氮磷储量随距离增加差异不显著,但从0.7 H处开始就基本呈先增加后降低的趋势,说明防护林会与农田产生竞争,吸收农田内养分。农田距林带距离越小,受遮荫影响越大,距林缘不同距离处的农作物产量连续下降,且距林带越近,下降幅度就越大[32-34]。王宁庚等[35]调查了宁夏引黄灌区农田防护林网胁地情况,发现1 H处及以内林带胁地明显。垂直方向上,土壤特性也有显著差异,在本研究中,对于土壤水分储量,40~100 cm土层的土壤储水量贡献率显著高于0~40 cm土层,说明防护林和农作物吸收浅层水分较多。这是由于在0~100 cm土层内,农作物和防护林总的细根主要分布在0~60 cm,在60~100 cm随土层深度的加深,细根生物量密度逐渐减小,根系分布影响土壤水分养分的吸收利用[36]。综上所述,防护林网内资源分布存在差异,物种间存在资源的竞争和协同作用,影响防护林与农作物的资源利用。

合理安排农田防护林树木的宽度、结构、走向和间距,使林网内气候、水分、土壤等环境因素得到改变,从而改善农田的生态系统功能,缓解和防御各种农业自然灾害[37]。本研究发现,4行林带的防护效益最好,由于防护林和农田之间的竞争,水分和养分资源的利用不同,导致植被生长状态的差异,选择合理结构对防护林建设最为重要[38-39]。本研究选择了几种成熟的农田防护林模式,它们都具有较好的营养供应功能。在实际实践中,防护林系统的建设应注意在不同恢复年份增加土地施肥和农业管理,在不同的农田防护林系统下,采用不同的农田管理措施,以减少水分和养分竞争,实现最佳生态效益,我们应考虑如何配置防护林网络,才能在实际生产中实现生态效益最大化[40-41]。在防护林建设过程中,考虑不同模式的防护林如何更好地缓解资源竞争问题,实现更好的生态效益。农田防护林是一种高效的生物工程,对改善生态环境具有

重要的保护和调节作用[42]。利用基于自然的解决方案设计可持续性的综合农业管理模式，这与本研究的结果一致[9]。随着人们对资源和环境的日益关注，防护林系统在改善生态环境方面的效益将越来越受到关注。了解不同防护林模式对土壤性质和环境因子的影响，对于合理实现当地生态系统的生态效益具有重要意义。

4 结 论

本文研究了河套灌区三种成熟农田防护林系统，测定了其土壤性质和植被属性，并计算其相关生态系统功能（土壤水分和养分储量），分析了不同防护林下的生态效益。结论如下：

（1）从整体上看，4行林带、5行林带和8行林带的土壤容重差异不大，分别为1.63 $g\cdot cm^{-3}$、1.62 $g\cdot cm^{-3}$、1.65 $g\cdot cm^{-3}$，土壤pH值均为弱碱性，分别为8.05、7.93和8.08，但从水平和垂直方向上看土壤性质均有显著差异。

（2）防护林系统的植被属性也存在差异，4行林带的整体长势比较好，其平均树高为30.06 m，胸径为0.41 m，农作物产量也最高，为15.75 $t\cdot hm^{-2}$。

（3）总体来说防护林具有较好的保水性和养分供应功能，但不同防护林系统在水平和垂直方向上的土壤水分和养分储量有差异；其中4行林带的土壤水分储量和养分储量高于其他林带，分别为SMS 237.44 mm、SCS 544.93 $g\cdot m^{-2}$、SNS 953.72 $g\cdot m^{-2}$和SPS 859.04 $g\cdot m^{-2}$；说明4行林带水分保持与养分供给能力高于其他林带，更适合当地的防护林结构配置。

（4）基于冗余分析发现，不同防护林的环境因子与生态系统功能密切相关，其中土壤因子与土壤水分和养分储量密切相关，这表明在实践过程中不仅要考虑农田防护林的配置模式，还要考虑其实际生长条件和土壤性质。

参考文献（References）：

[1] Brandle J R, Hodges L, Zhou X H. Windbreaks in North American agricultural systems[J]. Agroforestry Systems, 2004, 61-62(1-3): 65-78.

[2] Mazurek R, Zaleski T. Shelterbelt as Factor Affecting Physical Properties of Adjacent Farmland Soils[R]. 2nd International Symposium of Soil Physics, 2017.

[3] 李广毅, 周心澄, 王忠林, 等. 毛乌素沙地生态经济型防护林体系结构研究(技术总报告)[J]. 水土保持研究, 1995, 2(2): 2-35. [Li Guangyi, Zhou Xincheng, Wang Zhonglin, et al. Study on structure of eco-economical type of protection forest system to maowusu sandy land[J]. Research of Soil and Water Conservation, 1995, 2(2): 2-35.]

[4] 刘新春, 赵勇钢, 刘小芳, 等. 晋西黄土区人工林细根与土壤水碳的耦合关系[J]. 生态学报, 2019, 39(21): 7987-7995. [Liu Xinchun, Zhao Yonggang, Liu Xiaofang, et al. Coupling fine roots with soil moisture and organic carbon in artificial forests in loess region of western Shanxi Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(21): 7987-7995.]

[5] Campi P, Palumbo A D, Mastrorilli M. Effects of tree windbreak on microclimate and wheat productivity in a Mediterranean environment[J]. European Journal of Agronomy, 2009, 30(3): 220-227.

[6] 李程远. 林带对黑土坡耕地土壤养分空间分布及有效性的的影响[D]. 哈尔滨：东北林业大学, 2021. [Li Chengyuan. Effects of Shelterbelt on Spatial Distribution and Avail Ability of Soil Nutrients in Black Soil Slope Farmland[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2021.]

[7] 侍世玲, 任晓萌, 张晓伟, 等. 库布齐沙漠沙枣防护林土壤养分及化学计量特征[J].干旱区研究, 2022, 39(2): 469-476. [Shi Shiling, Ren Xiaomeng, Zhang Xiaowei, et al. Soil nutrients and stoichiometric characteristics of the *Elaeagnus angustifolia* shelterbelt in the Hobq Desert[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(2): 469-476.]

[8] 黄少辉, 杨军芳, 杨云马, 等. 长期应用养分专家管理模式提高小麦玉米轮作氮肥利用率及土壤有机碳固存[J]. 华北农学报, 2021, 36(2):154-161. [Huang Shaohui, Yang Junfang, Yang Yunma, et al. Long-term nutrient expert management improves nitrogen use efficiency and enhances soil organic carbon sequestration in wheat-maize rotation system[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2021, 36(2): 154-161.]

[9] Wu Y W, Wang Q, Wang Z, et al. Impact of poplar shelterbelt plantations on surface soil properties in northeastern China[J]. Canadian Journal of Forest Research, 2018, 48: 559-567.

[10] Muthuri C W, Ong C K, Black C R, et al. Tree and crop productivity in Grevillea, Alnus and Paulownia-based agroforestry systems in semi-arid Kenya[J]. Forest Ecology & Management, 2005, 212(1-3): 0-39.

[11] Shen Q, Gao G Y, Hu W, et al. Spatial-temporal variability of soil water content in a cropland-shelterbelt-desert site in an arid inland river basin of Northwest China[J]. Journal of Hydrology, 2016, 540: 873-885.

[12] 周晓兵, 陶冶, 吴林, 等. 塔克拉玛干沙漠南缘荒漠绿洲过渡带不同土地利用影响下土壤化学计量特征[J]. 生态学报, 2019, 39(3): 969-980. [Zhou Xiaobing, Tao Ye, Wu Lin, et al. Soil stoichiometry in different land-use categories in desert-oasis ecotones of the southern Taklimakan Desert[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(3): 969-980.]

[13] Deng C L, Zhang B Q, Cheng L Y, et al. Vegetation dynamics and their effects on surface water-energy balance over the Three-North Region of China[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2019, 275: 79–90.

[14] 哈斯尔, 郑嗣蕊, 涂伊南, 等. 陕北固沙林恢复过程中土壤碳氮组分库特征与固存效应[J]. 干旱区研究, 2019, 36(4): 835–843. [Ha Sier, Zheng Sirui, Tu Yinan, et al. Sequestration efficiency and component characteristics of soil carbon and nitrogen contents during restoration of sand-fixing forests in North Shaanxi Province [J]. Arid Zone Research, 2019, 36(4): 835–843.]

[15] Cao J, He X, Chen Y, et al. Leaf litter contributes more to soil organic carbon than fine roots in two 10-year-old subtropical plantations[J]. Science of the Total Environment, 2020, 704: 135341.

[16] 史晓亮, 李颖, 邓荣鑫. 基于RS和GIS的农田防护林对作物产量影响的评价方法[J]. 农业工程学报, 2016, 32(6): 175–181. [Shi Xiaoliang, Li Ying, Deng Rongxin. Evaluation method for effect of farmland shelterbelts on crop yield based on RS and GIS[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering 2016, 32(6): 175–181.]

[17] Bogunovic I, Telak L J, Pereira P. Experimental comparison of runoff generation and initial soil erosion between vineyards and croplands of eastern croatia: A case study[J]. Air, Soil and Water Research, 2020(13): 1–9.

[18] 赵清贺, 刘倩, 马丽娇, 等. 黄河中下游典型河岸带土壤性质空间变异及其对环境的响应[J]. 应用生态学报, 2015, 26(12): 3795–3802. [Zhao Heqing, Liu Qian, Ma Lijiao, et al. Spatial variation in riparian soil properties and its response to environmental factors in typical reach of the middle and lower reaches of the Yellow River[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(12): 3795–3802.]

[19] Han F P, Ren L L, Zhang X C. Effect of biochar on the soil nutrients about different grasslands in the Loess Plateau[J]. Catena, 2016, 137: 554–562.

[20] Rivest D, Lorente M, Olivier A, et al. Soil biochemical properties and microbial resilience in agroforestry systems: Effects on wheat growth under controlled drought and flooding conditions[J]. Science of the Total Environment, 2013, 463: 51–60.

[21] Zhang Y K, Xiao Q L, Huang M B. Temporal stability analysis identifies soil water relations under different land use types in an oasis agroforestry ecosystem[J]. Geoderma, 2016, 271: 150–160.

[22] Yang B, Wang R, Xiao H, et al. Spatio-temporal variations of soil water content and salinity around individual *Tamarix ramosissima* in a semi-arid saline region of the upper Yellow River, Northwest China[J]. Journal of Arid Land, 2018, 10: 101–114.

[23] 朱甜甜, 朱玉伟, 张云, 等. 伊犁河谷农田防护林生物量及碳储量研究[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(9): 298–302. [Zhu Tiantian, Zhu Yuwei, Zhang Yun, et al. Study on biomass and carbon storage of farmland shelterbelt in Yili Valley[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2019, 47(9): 298–302.]

[24] 孙家兴, 赵雨森, 辛颖. 黑土区不同林龄杨树农田防护林土壤养分变化[J]. 东北林业大学学报, 2018, 46(3): 59–62, 90. [Sun Jiaxing, Zhao Yusen, Xin Ying. Soil nutrient changes of different stage of poplar farmland shelter belts in black soil region[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2018, 46(3): 59–62, 90.]

[25] 何春霞, 郑宁, 张劲松, 等. 农林复合系统水热生态特征研究进展[J]. 中国农业气象, 2016, 37(6): 633–644. [He Chunxia, Zheng Ning, Zhang Jinsong, et al. Research advances on hydrological and thermal characteristics of agroforestry system[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2016, 37(6): 633–644.]

[26] 王栋. 内蒙古河套灌区农田防护林对田间土壤水分的影响[D]. 北京：北京林业大学, 2021. [Wang Dong. Effects of Shelterbelts on Farmland Soil Water in Hetao Irrigation Area of Inner Mongolia [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2021.]

[27] Yang S, Bai Y, Alatalo J M , et al. Spatio-temporal changes in water-related ecosystem services provision and trade-offs with food production[J]. Journal of Cleaner Production, 2020: 125316.

[28] 王栋, 肖辉杰, 辛智鸣, 等. 不同配置农田防护林对田间土壤水分空间变异的影响[J]. 水土保持学报, 2020, 34(5): 223–230. [Wang Dong, Xiao Huijie, Xin Zhiming, et al. Effect of different configurations of farmland shelterbelt system on spatital variation of soil moisture content[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(5): 223–230.]

[29] 马亮. 干旱区滴灌枣–棉间作系统蒸发蒸腾量及地下竞争关系研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2018. [Ma Liang. Study on the Evapotranspiration and the Underground Competition Relationship of Jujube-contton Intercropping System under Drip Irrigation in Arid Area[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2018.]

[30] 程昊天, 孔涛, 姜涛, 等. 辽西北沙地苹果–花生间作系统土壤养分空间分布特征及间作效应[J]. 水土保持通报, 2020, 40(6): 43–50. [Cheng Haotian, Kong Tao, Jiang Tao, et al. Spatial distribution characteristics of soil nutrients and intercropping effect in sandy land apple-peanut intercropping system in North west Liaoning Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40 (6): 43–50.]

[31] Hou Q, Brandle J, Hubbard K, et al. Alteration of soil water content consequent to root-pruning at a windbreak/crop interface in Nebraska, USA[J]. Agroforestry Systems, 2003, 57: 137–147.

[32] 曹琦. 不同间作模式对枣园小气候及作物产量的影响[D]. 阿拉尔: 塔里木大学, 2019. [Cao Qi. Effects of Different Intercropping Patterns on Microclimate and Crop Yield in Jujube Garden[D]. Aral: Tarim University, 2019.]

[33] 赵阳, 乔杰, 王炜炜, 等. 泡桐林网系统内小麦产量对光合有效辐射分布的响应[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(5): 647–655. [Zhao Yang, Qiao Jie, Wang Weiwei, et al. Response of wheat yield to light distribution in intercropped *Paulownia fortuneii* shelterbelt and wheat[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25 (5): 647–655.]

[34] 胡海波, 贾西川. 我国平原农区林带胁地效应及其控制措施研究进展[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2021, 45(2): 234-240. [Hu Haibo, Jia Xichuan. Review on negative effects and its control measures of forest belt in plain agricultural areas of China [J]. Journal of Nanjing Forestry University(Natural Sciences Edition), 2021, 45(2): 234-240.]

[35] 王宁庚, 左忠, 潘占兵. 宁夏引黄灌区农田防护林网胁地情况调查研究[J]. 宁夏农林科技, 2016, 57(11): 22-25, 22. [Wang Ninggeng, Zuo Zhong, Pan Zhanbing. Research on farmland shelterbelts in yellow river irrigation area in ningxia[J]. Ningxia Journal of Agriculture and Forestry Science and Technology, 2016, 57 (11): 22-25, 22.]

[36] 陈作州, 张宇清, 吴斌, 等. 根障对农田林网内土壤水分和小麦产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(1): 71-77, 89. [Chen Zuozhou, Zhang Yuqing, Wu Bin, et al. Effect of root barrier on soil moisture and wheat yield within farmland shelternet[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2012, 30(1):71-77, 89.]

[37] Zhao W, Hu G, Zhang Z, et al. Shielding effect of oasis-protection systems composed of various forms of wind break on sand fixation in an arid region: A case study in the Hexi Corridor, Northwest China[J]. Ecological Engineering, 2008, 33: 119-125.

[38] 尚白军, 吴书普, 周智彬, 等. 新疆莫索湾垦区150团防护林防护效益分析[J]. 中国水土保持科学, 2021, 19(5): 45-52. [Shang Baijun, Wu Shupu, Zhou Zhibin, et al. Analysis on protection benefit of shelterbelt in regiment 150 of Mosuowan, Xinjiang[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2021, 19(5): 45-52.]

[39] 邹鑫, 朱习爱, 陈春峰, 等. 农林复合系统的水土保持效益[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2020, 42(2): 382-392. [Zou Xin, Zhu Xi'ai, Chen Chunfeng, et al. Soil and water conservation benefits of agroforestry systems[J]. Journal of Yunnan University: Natural Sciences Edition, 2020, 42(2): 382-392.]

[40] Qiao Y, Fan J, Wang Q. Effects of farmland shelterbelts on accumulation of soil nitrate in agro-ecosystems of an oasis in the Heihe River Basin, China[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2016, 235: 182-192.

[41] Lang M, Li P, Ti C P, et al. Soil gross nitrogen transformations are related to land-uses in two agroforestry systems[J]. Ecological Engineering, 2019, 127: 431-439.

[42] Shi X, Li Y, Deng R. A method for spatial heterogeneity evaluation on landscape pattern of farmland shelterbelt networks: A case study in midwest of Jilin Province, China[J]. Chinese Geographical Science, 2011, 21: 48-56.

Effects of different farmland shelterbelts on soil water and nutrient storage in the Hetao Irrigation District

JI Mingxin[1], FENG Tianjiao[1,2], XIAO Huijie[1], XIN Zhiming[3], LI Junran[4], WANG Dong[1]

(1. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Jixian National Forest Ecosystem Observation and Research Station, Jixian 042200, Shanxi, China; 3. Inner Mongolia Dengkou Desert Ecosystem National Observation Research Station, Dengkou 015200, Inner Mongolia, China; 4. Department of Geography, The University of Hong Kong, Hong Kong 999077, China)

Abstract: As an effective agricultural management method for improving ecological and environmental benefits, the farmland shelterbelt system is crucial in improving soil physical and chemical properties, the ecological environment, and crop yield. This study clarifies the effects of this system on ecosystem functions and provides a guide for the ecological restoration of fragile ecosystems. In the Hetao Irrigation District, three typical farmland shelterbelts (four-, five-, and eight-line patterns) were selected to measure soil properties at a 0−100 cm depth and vegetation properties of shelterbelts and farmland at different distances (0.3 H, 0.7 H, 1 H, 2 H, 3 H, and 4 H) from the shelterbelts during the growing seasons from 2019 to 2021. Soil moisture storage (SMS) and soil nutrient storage [soil carbon storage (SCS), soil nitrogen storage (SNS), and soil phosphorus storage (SPS)] were measured. The results showed that (1) the soil bulk density and clay content of different shelterbelts differed significantly in the horizontal direction, while the soil properties differed significantly in the vertical direction. (2) The shelterbelts had enhanced water retention and nutrient supply functions, and the soil water and nutrient reserves of the four-line pattern were higher than those of the five- and eight-line patterns (SMS = 237.44 mm; SCS = 544.93 $g\cdot m^{-2}$; SNS = 953.72 $g\cdot m^{-2}$; SPS = 859.04 $g\cdot m^{-2}$). (3) The average tree height and DBH of the four-row shelterbelt were 30.06 m and 0.41 m, respectively. Additionally, the four-row shelterbelt had the maximum crop yield of 15.75 $t\cdot hm^{-2}$. (4) Redundancy analysis showed that a close relationship existed between environmental factors and ecosystem functions in the different shelterbelts, soil characteristics were closely related to soil water and nutrient reserves, and vegetation attributes were negatively correlated with SNS and SPS. In conclusion, the four-line pattern demonstrated the strongest capacity for water and nutrient supply. The results of this study provide a sufficient theoretical basis for shelterbelt construction and ecological restoration in ecologically fragile areas.

Keywords: farmland shelterbelt; soil properties; vegetation attribute; ecosystem function; farmland management